

配网避雷器预期运行寿命计算评估

彭向阳¹, 王保山², 彭发东¹, 熊易²

(1. 广东电力科学研究院, 广州 510080; 2. 国网电力科学研究院, 武汉 430074)

摘要: 电气设备状态评价与风险评估是当前电网安全和供电可靠性研究工作的重要方向,对电气设备预期使用寿命进行评估是电网可靠性和安全评估的重要判据之一,但是目前中国有关电气设备使用寿命还未建立相关标准。配网避雷器是配网防雷保护的主要设备,广东地区雷电活动强烈,加之配网避雷器使用量大、价格便宜、准入门槛低,在设计、工艺、制造、选型、安装、运维及检测环节存在不少问题,导致运行故障率较高。笔者通过对配网避雷器故障模式和受损决定因素进行分析,提出配网避雷器预期寿命计算路线,并具体介绍评估方法、过程和计算实例,可为电气设备预期寿命评估提供借鉴。

关键词: 配网避雷器; 故障模式; 预期寿命; 地闪密度; 雷电过电压

中图分类号: TM862

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2012)12-0026-07

Estimation of Expected Working Life of Lightning Arrester for Distribution Network

PENG Xiang-yang¹, WANG Bao-shan², PENG Fa-dong¹, XIONG Yi²

(1. Guangdong Electric Power Research Institute, Guangzhou 510080, China;

2. State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: Expected working life estimation of electrical equipment is important for power grid reliability and safety assessment. However, there is not a standard relevant to working life of electrical equipment in China. Lightning arrester is a main lightning protection equipment of distribution network. The lightning in Guangdong Province is very strong, which results in many problems in arresters' design, process, manufacture, selection, installation, operation, maintenance and inspection processes, leading to high failure rate. In this paper, the fault mode and decisive damage inducing factors of the lightning arrester for distribution network are analyzed, the computing route of expected working life of lightning arrester is proposed, and the concrete estimation method, estimation process and calculation example are discussed to provide a reference for life expectancy assessment of electrical equipment.

Key words: lightning arrester for distribution network; fault mode; expected working life; lightning density; lightning overvoltage

0 引言

判断电气设备使用寿命是电力系统资产管理的重要部分,也是评估电力系统能否安全运行的判据之一。然而电气设备的寿命终结往往是电力系统很主观的判断,因为设备出现故障很可能有很多戏剧性的偶然因素。

避雷器的功能是为了保护其他设备,如果它失于保护,那么其应用毫无意义。因此,避雷器的寿命

应从避雷器功能和耐受能力来考虑,然后再考虑是否更换新的避雷器。

目前中国电气设备的使用寿命还未建立相关标准,也尚未对此作出任何规定。国外有些国家统计,避雷器的寿命可能在20至50年之间变化。俄罗斯在避雷器技术条件中规定避雷器运行寿命值见表1。

电力系统通常根据经济和技术因素,将主要设备的经济寿命与其他变电站设备相配合,以此来确定适当的避雷器更换周期。评估标准应考虑到常规更换是可变的,因为避雷器一般不需要修理或大修,

表1 避雷器预期运行寿命值

Tab. 1 Expected operating life of lightning arrester

项目	数值					
系统标称电压/kV	110	220	330	500	750	1 150
置信水平 P	0.98					
运行寿命不小于/年	20	25	25	25	30	30

而且避雷器是一种以自我牺牲为手段的保险措施,以避免变压器、开关等更贵重的设备发生故障^[1-10]。

为评估避雷器使用寿命,首先,制造厂应该根据国际和国家法律规定,对其生产的避雷器或避雷器元件报废和(或)循环利用提供足够信息。其次,应对避雷器因过电压而动作的统计规律有充分认识。实际上这一点很难得到。因此,目前开展避雷器使用寿命评估工作还存在很多困难,笔者在此方面进行尝试和探讨。

1 影响配网避雷器故障的决定性因素

调查广东地区配网避雷器故障模式时,发现避雷器功能失效或故障的可能原因包括^[11-20]以下几个方面。

1.1 避雷器功能元件失效

功能元件,主要是 ZnO 电阻片的失效。对无间隙避雷器而言,首先表现在长期工作电压下的老化,漏流增大和参考电压降低。这一情况,在早期生产的无间隙避雷器中尤为突出。现在这一问题已基本解决,在长期工作电压下的功能元件寿命可以很长。然而,当避雷器规律性地承受雷电或操作过电压,金属氧化物电阻片可能会劣化。调查表明,广东地区配网用避雷器与雷电过电压相关的使用寿命大约是 8~10 年。所以,雷电过电压下的闪络或击穿是广东地区配网避雷器故障的主要表现形式。

1.2 避雷器密封失效

密封件/垫片随着时间推移可能会变得脆弱,导致水份浸入,引起内部漏电起痕、介质击穿和内部短路。密封失效也是避雷器一直关注问题。

对于空心筒式结构避雷器,当密封系统已经劣化到一定程度,而不再能将功能元件与外部大气条件相隔离,湿汽渗入弱化了避雷器功能元件的绝缘强度,导致避雷器外壳内部闪络。

在满足现行避雷器标准规定的技术要求和检验方法的前提下,与密封相关的可靠寿命时间大约是 20~30 年。运行条件和气候环境也是影响避雷器寿命的重要因素。

1.3 避雷器安装处污秽增大

空心筒式结构避雷器对污秽比较敏感,避雷器

故障可能因污秽增大引起。新的污染源可能是一个新的工厂、公路或铁路建在避雷器附近。

污秽增大对多节元件避雷器的影响比较大,对配网用单节避雷器影响不大。

讨论避雷器使用寿命,在分析避雷器结构和所有零部件中,最重要的是总结影响避雷器寿命的关键因素。综合分析,广东地区配网避雷器在雷电过电压下闪络或击穿是决定性因素。

2 配网避雷器预期寿命计算路线

评估避雷器的可靠性,即在一个给定的置信水平下,评估避雷器长期无故障预期运行寿命。

计算配网避雷器预期运行寿命,是为了验证配网避雷器在某具体配网系统内限制雷电过电压时,其工作的可靠性。如果具有一定置信水平 P 的配网避雷器预期运行寿命为 N 年, N 值应该不低于技术条件的规定值,则配网避雷器保护配电系统是可靠的。

广东地区配网避雷器预期寿命的计算路线应包括以下步骤:

- 1) 计算在不安装避雷器时,避雷器安装点处雷电过电压幅值的统计分布;
- 2) 计算 1 年内避雷器雷电冲击放电能力资源消耗的统计分布;
- 3) 确定避雷器限制雷电过电压的预期寿命。

3 安装点雷电过电压幅值统计

计算不安装避雷器时配网用避雷器安装点处非限制性雷电过电压的统计分布,应包括在避雷器安装点处非限制性雷电过电压的幅值、波形及每年雷电过电压次数的统计数据,即各自的数学期望 $\bar{K}$ 和标准偏差(σ_k)。

考虑的因素应包括线路非限制性雷电过电压所在地区的雷电日水平、落雷密度、线路防雷设计、进线段防雷设计、变电站的设备布置、运行方式以及变电站所处的地形等。

3.1 配网线路直击雷过电压统计

3.1.1 直击雷过电压幅值计算

由于配网架空线多无屏蔽,雷直击导线概率较大,而且幅值较高。当雷直击于无限长导线 A 点时(见图 1),A 点的直击雷过电压(kV)为

$$U_A = \frac{i}{2} \frac{Z}{2} = \frac{i \times Z}{4} \quad (1)$$

式(1)中: i 为雷电通道主放电电流幅值,kA; Z 为线路波阻抗, Ω 。

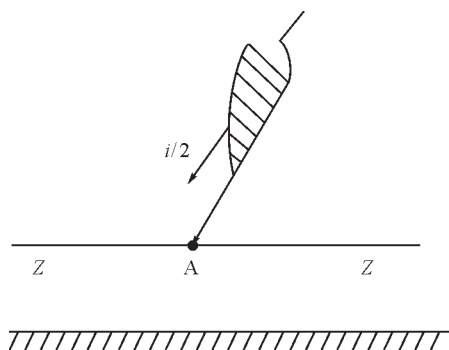


图 1 雷击无限长导线的电流波

Fig. 1 Current wave of lightning strike infinite long wires

3.1.2 每年每百公里平均直击雷次数计算

配网一般高度架空线路每年每百公里平均直
击雷击次数 N_1 为

$$N_1 = \gamma \times \frac{10h}{1\,000} \times 100 \times T = \gamma \times h \times T \quad (2)$$

式(2)中: γ 为每雷电日每 km^2 平均地闪次数; $10h$ 为线路的等值受雷宽度; h 为线路的平均高度, m ; T 为当地年平均雷电日数。

3.1.3 雷直击架空导线的耐雷水平

配网线路绝缘子的闪络电压不高,如 10 kV 线路绝缘子的雷电冲击闪络电压大约为 75 kV,若取临界值 $U_A=75$ kV,波阻抗 $Z=300\ \Omega$ 时,通过式(1)得到架空线路直击雷时耐雷水平 $I_1=1$ kA。雷击无限长导线的电流波见图 1。

3.2 雷击塔顶导线感应雷过电压统计

当雷击架空线路塔顶或附近地面时,会在架空线路的三相导线上出现感应过电压,感应过电压包括静电感应分量和电磁感应分量,通常由于主放电通道和导线互相垂直,所以电磁感应分量不大,静电分量起主要作用。

3.2.1 架空导线雷电感应过电压计算

雷击架空线路塔顶时,架空导线上雷电感应过电压计算公式为

$$U_c = \frac{I \times h_d}{2.6} \quad (3)$$

式(3)中: I 为雷电通道主放电电流幅值,kA; h_d 为架空线路导线高度,m。

3.2.2 每年每百公里平均塔顶雷击次数计算

配网架空线路每年每百公里平均塔顶雷击次数 N , 为

$$N_2 = \gamma \times T \times g \times h = g \times N_1 \quad (4)$$

式(4)中: h 为线路的平均高度,m; g 为击杆率=雷击杆塔顶部(及其直接附近的避雷线)的次数/雷击线路总次数,见表2。

表2 击杆率

Tab. 2 Strike tower rate

避雷线根数	0	1	2
平原	1/2	1/4	1/6
山丘	—	1/3	1/4

3.2.3 雷击塔顶的耐雷水平

当雷击线路塔顶时,塔顶电位为

$$U_T = I(R_E + \frac{L_T}{2.6}) \quad (5)$$

式(5)中: R_E 为杆塔冲击接地电阻, Ω ; L_T 为杆塔电感, μH 。

架空导线上的感应电压见式(3)。

线路绝缘子上的电压为

$$U_i = I(R_E + \frac{L_T}{26} - \frac{h_d}{26}) \quad (6)$$

如 10 kV 架空线路绝缘子雷电冲击闪络电压为 75 kV, 即取临界值 $U_i = 75$ kV, 杆塔接地电阻 10Ω , 杆塔电感 $10 \mu\text{H}$, 导线高度 10 m , 通过式(6)得到雷击线路塔顶时, 耐雷水平 $I_2 = 7.5 \text{ kA}$ 。

3.3 雷击配网线路外时导线感应过电压

3.3.1 导线感应雷过电压幅值计算

雷击架空线路外地面时,在架空线路三相导线上出现感应过电压。感应过电压计算式为

$$U_i = 25 \times \frac{I \times h_d}{l} \quad (7)$$

式(7)中: I 为雷电通道主放电电流幅值,kA; h_d 为架空线路导线高度,m; l 为雷击点与导线的垂直距离,m。

3.3.2 每年每百公里导线感应雷过电压次数计算

配网架空线路每年每百公里因雷击架空线路外导线上出现感应雷过电压的次数 N_3 , 假设地闪次数为 N , 则 $N_3 = k \times N$, 其中 $k \in (0, 1)$, $N = n \times S$, 其中 n 表示地闪密度, 次/($\text{km}^2 \cdot \text{年}$); S 表示计算区域的面积, km^2 。

3.4 广东地区雷电流幅值概率统计

通过雷电定位系统统计 1999-2008 年雷电流幅值累积概率数据,用最小二乘法拟合出正、负极性综合后的雷电流幅值累积概率表达式为

$$P(>I) = \frac{1}{1 + (I/35.6)^{3.0}} \quad (8)$$

式(8)中: $P(>I)$ 时雷电流幅值超过 I 的概率; I 为雷电流幅值,kA;参数35.6反映的是中值电流,即雷电流幅值超过35.6 kA的概率为50%。

4 1 年内避雷器雷电放电资源消耗统计

配网避雷器 1 年内消耗的雷电冲击放电能力(能量值和电荷量值)资源等于

$$T_0 = \sum_{s=1}^3 \bar{N}_s \bar{T} \quad (9)$$

式(9)中: $\bar{N}_s$ 为配网用避雷器运行 1 年期间雷电过电压的预期有效作用次数; $\bar{T}$ 为一次雷电过电压消耗的雷电放电能力资源(能量值或电荷量值)数学期望值。

4.1 避雷器一次雷电消耗的雷电放电能力资源

4.1.1 一次雷电过电压通过避雷器雷电流幅值数学期望值计算

如果仅考虑线路远方落雷引起的雷电侵入波, 由于波的传播时间已超过了雷电流波的持续时间, 无须考虑波多次折反射的叠加效应, 因此通过避雷器的雷电流仅为单次进波。即可通过避雷器雷电流式(10)进行简单估算, 且具有相当的准确度。

$$I = \frac{2U_{in} - U_{res}}{Z} \quad (10)$$

式(10)中: I 为通过避雷器的雷电放电电流估算值; U_{res} 为避雷器配合电流下的残压; Z 为架空线路单相冲击波阻抗 (10 kV 线路 300 Ω); U_{in} 为架空线路绝缘雷电冲击耐受电压 (10 kV 中性点不接地系统为 75 kV)。

计算在不安装避雷器时, 配网避雷器安装点处非限制性雷电过电压的统计分布时, 应考虑配网架空线路耐雷水平。线路雷击闪络, 线路耐雷水平限制了线路过电压, 过电压受到截断。当线路较长时, 通过避雷器的雷电放电电流受线路绝缘水平决定的侵入波限制。所以, 超过架空线路耐雷水平的高幅值雷电流产生的雷电过电压幅值和概率均以线路耐雷水平为基础计算。离避雷器安装点处近区雷击的概率很小, 可不考虑。

雷电过电压时, 配网避雷器的伏安特性为

$$U_{res} = U_{1mA} + AI^a \quad (11)$$

以 10 kV 配电型避雷器($\phi 35 \text{ mm} \times 24 \text{ mm}$)为例, $U_{1mA} \geq 25 \text{ kV}$, 取 $U_{1mA} = 25 \text{ kV}$ 做计算。

1) 当 $I = 2.5 \text{ kA}$ 时, $U = 44 \text{ kV}$;

2) 当 $I = 5 \text{ kA}$ 时, $U = 48 \text{ kV}$ 。

将 1)、2)代入式(11), 求得 $A = 13.8$, $a = 0.28$, 即

$$U = 25 + 13.8 \times I^{0.28} \quad (12)$$

联合式(10)和(12)图解法求配网架空线路的耐雷水平。当绝缘子闪络时, 通过避雷器的雷电流幅值 $I = 0.38 \text{ kA}$ 。

4.1.2 一次雷电通过避雷器雷电流波长的选取

电流波形是考核避雷器雷电冲击放电电流的重要因素, 对于应用在有屏蔽线路的避雷器, 电流的持续时间为几十微秒, 对于应用在没有屏蔽线

线路的避雷器, 电流的持续时间为几百微秒, 依据 GB 11032—2010 关于雷电冲击放电能力试验要求, 200 μs 的波长已被认为是典型应用和多重雷击效应的适当折衷, 电流冲击波形大致为正弦波, 冲击电流瞬时值大于电流冲击峰值 5% 的持续时间应在 200~230 μs 之间。

4.1.3 一次雷电过电压通过避雷器雷电流电荷量数学期望值计算

依据步骤 1) 和 2) 得到雷击时绝缘子闪络通过避雷器雷电流幅值 $I = 380 \text{ A}$, 电流波形为 200 μs 近似正弦波时, 电荷量数学期望值 $Q = 48.4 \text{ mC}$ 。电荷量由电流积分得到, 见图 2、3。

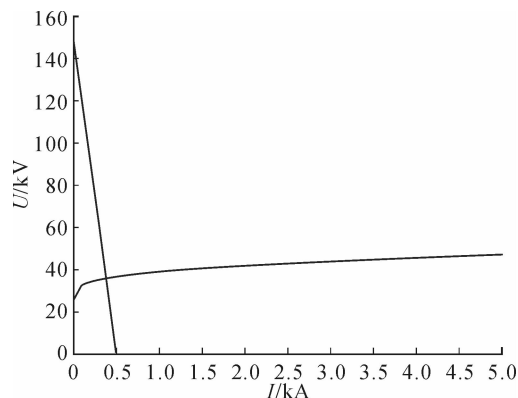


图 2 图解法求避雷器电流幅值

Fig. 2 Solving arrester current amplitude using graphic method

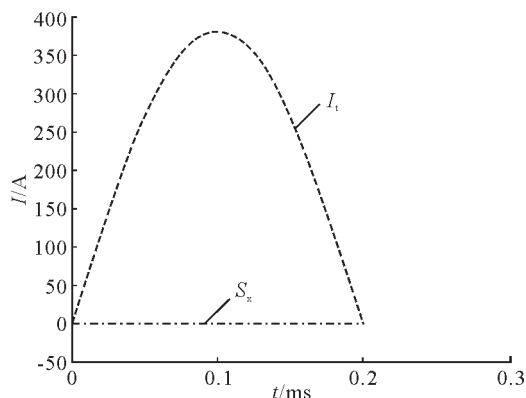


图 3 电流积分求电荷量值

Fig. 3 Solving charge quantity by current integral

4.2 避雷器运行 1 年雷电过电压有效作用次数

$\bar{N}_1$ 为配网用避雷器运行 1 年期间因雷直击线路的雷电过电压预期有效作用次数; $\bar{N}_2$ 为配网避雷器运行 1 年期间因雷击塔顶的感应过电压预期有效作用次数; $\bar{N}_3$ 为配网避雷器运行 1 年期间因雷击线路外感应过电压预期有效作用次数。

在考虑有效作用次数时, $\bar{N}_1$ 、 $\bar{N}_2$ 可认为仅计及超过线路耐雷水平的过电压次数, 而对于 $\bar{N}_3$ 则应考虑雷击线路外的有效截断距离。当然, 这会影响计

算的置信水平。

5 确定配网避雷器雷电过电压下预期寿命

配网避雷器雷电过电压的预期寿命由式(13)确定。

$$\bar{N}(P) = \frac{T_R}{T_0(P)} = \frac{T_R}{\sum_s \bar{N}_s \bar{T}} \quad (13)$$

式(13)中: T_R 为避雷器拥有的(一次性)雷电冲击放电能力(能量值或电荷量值)资源; $\bar{T}_0$ 为避雷器1年内消耗的雷电冲击放电能力资源; $\bar{T}$ 为一次雷电过电压下避雷器消耗资源数学期望值; $\bar{N}_s$ 为配网避雷器运行1年期间雷电过电压的预期作用次数; P 为置信水平。

$\bar{T}$ 利用图2图解确定。

5.1 避雷器拥有的雷电放电能力资源计算

根据标准 GB 11032—2010 对避雷器性能要求, 10 kV 配电型、电站型以及线路型复合外套避雷器雷电冲击放电能力由 20 次 5 kA、8/20 μ s 雷电波和 2 次 65 kA、4/10 μ s 大电流的能量和电荷量决定, 强雷型避雷器雷电冲击放电能力由 20 次 20 kA、8/20 μ s 雷电波和 2 次 40 kA、30/80 μ s 雷电波的能量和电荷量决定, 见表3。

表3 避雷器拥有的一次性雷电放电能力资源

Tab. 3 Lightning discharge capacity resources of arrester

型号	配电型	电站型	线路型	强雷型
避雷器拥有的能量/kJ	218.4	182.3	174.6	709.5
避雷器拥有的电荷量/C	17.98	14.73	14.37	27.44

5.2 避雷器1年消耗雷电放电能力资源计算

在给定的置信水平 P 下避雷器运行寿命的数学期望值由式(14)求出。

$$N(P) = \frac{T_R}{T_0(P)} = \frac{T_R}{\sum_s N_s T(P)} \quad (14)$$

$T(P)$ 由相应置信水平 P 的 T 值给定, 这里以一次雷电过电压时消耗的电荷量 Q 值为例计算。前面已通过积分得到一次雷电过电压时消耗的电荷量 Q 值的数学期望值为 48.4 mC, 即得到

$$T_0(Q) = 48.4 \text{ mC} \times (\bar{N}_1 + \bar{N}_2 + \bar{N}_3) \quad (15)$$

置信水平 P 表示雷电过电压超过架空线路耐雷水平的概率。

5.3 配网避雷器雷电过电压预期运行寿命计算

联合表3的数据和式(15), 代入式(14), 即可求

出配网避雷器雷电过电压预期寿命。

6 配网避雷器预期运行寿命计算实例

由于按上述计算方法要求的部分参数暂无统计结果, 故以下将采用简化计算方法来计算配网避雷器预期运行寿命, 以广州地区为例。

计算条件: 假设某配网架空线路所在地区地闪密度 $n=13.9$ 次/ $\text{km}^2 \cdot \text{年}$, 平均年雷电日数为 80.3 天, 无屏蔽避雷线, 架空线路长 5 km, 导线高度 10 m。

计算过程: 避雷器所储备的(一次性)雷电冲击放电能力(电荷量值)资源 $T_R=17.98$ C; 避雷器一次雷电过电压消耗的雷电冲击放电能力资源(电荷量值) $Q=48.4$ mC; 避雷器运行1年期间因雷直击线路的雷电过电压预期有效作用次数 $N_1=139 \times 5/100=6.95$ 次, 置信水平 $P_1 \approx 100\%$, $\bar{N}_1=N_1 \times P_1=6.95$ 次; 避雷器运行1年期间因雷击塔顶的感应雷电过电压预期有效作用次数 $N_2=0.5 \times N_1=3.5$ 次, 置信水平 $P_2 \approx 99.4\%$, $\bar{N}_2=N_2 \times P_2 \approx 3.5$ 次; 配网用避雷器运行1年期间因雷击线路外的感应雷电过电压预期有效作用次数为 $N_3=k \times n \times S=0.5 \times 13.9 \times 10=69.5$ (其中, $k=0.5$, $S=5 \text{ km} \times 2 \text{ km}$)。

当线路外雷击距离取 1 km 时, 按式(7)计算引起绝缘子闪络雷电流 300 kA, 据广东雷电流幅值概率统计可知, 超过 300 kA 雷电流概率为 0, 故置信水平 $P_3=100\%$, $\bar{N}_3=N_3 \times P_3=69.5$ 次。

按式(14)可得配网避雷器1年内消耗的雷电冲击放电能力资源(电荷量值) $T_0(P)=Q \times (\bar{N}_1 + \bar{N}_2 + \bar{N}_3)=3\ 869.58$ mC ≈ 3.87 C。

按式(15)可得到广州地区某配网避雷器预期运行寿命 $\bar{N}(P) = \frac{T_R}{T_0(P)} = \frac{17.98 \text{ C}}{3.87 \text{ C}}$ 年, 置信水平 $P=0.99$ 。

根据上述计算案例, 当地闪密度 $n \in (12, 15)$ 次/($\text{km}^2 \cdot \text{年}$) 时, 配网用避雷器使用平均寿命大约在 4~5 年。其他地区配网避雷器平均使用寿命, 应依据配网具体情况和雷害情况, 按上述推荐配网避雷器预期寿命计算路线和方法进行计算。以此方法, 计算出广东其他地区配网避雷器推荐使用寿命年限见表4, 对达到运行寿命年限的配网避雷器, 可考虑采取及时更换的维护策略。

7 结语

基于对广东地区配网避雷器故障模式和受损因素调查, 分析配网避雷器使用寿命决定性因素为雷电过电压, 提出用配网避雷器拥有的雷电放电能力资源和雷电过电压消耗的一次避雷器雷电放电能力

表 4 配网避雷器推荐使用寿命

Tab. 4 Recommend using life of distribution lightning arrester

雷电等级	地闪密度区间/[次·(km ² ·年) ⁻¹]	使用寿命/年
1	1.5~3	15~20
2	3~6	10~15
3	6~9	7~10
4	9~12	5~7
5	12~15	4~5
6	15~20	3~4

资源的计算路线和方法。

介绍配网避雷器预期寿命评估方法、过程和计算实例,根据地闪密度给出广东地区配网避雷器预期寿命推荐年限,为开展配网避雷器状态检修、制订维护策略提供依据,并为其他电气设备寿命评估和状态检修提供重要参考。

参考文献:

- [1] 杜澍春. 关于输电线路防雷计算中若干参数及方法的修改建议[J]. 电网技术, 1993, 20(12): 53-56.
DU Shu-chun. Suggestion on revising the calculation method and some parameters used in lightning protection of transmission lines[J]. Power System Technology, 1993, 20(12): 53-56.
- [2] 彭向阳. 广东省金属氧化物避雷器运行情况[J]. 电瓷避雷器, 2007(6): 21-25.
PENG Xiang-yang. Analysis on service status of MOA in Guangdong province[J]. Insulators and Surge Arresters, 2007(6): 21-25.
- [3] 彭向阳. 广东线路避雷器防雷效果及运行分析[J]. 电瓷避雷器, 2010(2): 21-25.
PENG Xiang-yang. Analysis on lightning protection effects and operation of line arresters in Guangdong power grid[J]. Insulators and Surge Arresters, 2010(2): 21-25.
- [4] 彭向阳, 郑晓光, 钟定珠. 加强广东 110 kV 及 220 kV 敞开式变电站雷电侵入波保护分析[J]. 广东电力, 2008, 21(7): 18-21.
PENG Xiang-yang, ZHENG Xiao-guang, ZHONG Ding-zhu. Research on incoming lightning protection for 110 kV and 220 kV open-air substations in Guangdong power grid[J]. Guangdong Electric Power, 2008, 21(7): 18-21.
- [5] 彭向阳, 张 斌, 余冬青, 等. 线路开关单相重合闸期间雷击事故及电磁暂态仿真[J]. 电网技术, 2009, 33(20): 177-182.
PENG Xiang-yang, ZHANG Bin, YU Dong-qing, et al. Analysis on lightning stroke accident in 220 kV transmission line during single-phase reclosure of line breaker and its electromagnetic transient simulation[J]. Power System Technology, 2009, 33(20): 177-182.
- [6] 李开霞, 张金波, 胡 钢. 用相角差法判断金属氧化物避雷器性能优劣的研究[J]. 高压电器, 2008, 44(1): 23-25.
LI Kai-xia, ZHANG Jin-bo, HU Gang. Performance evaluation of metal oxide surge arrester with phase difference method[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(1): 23-25.
- [7] 胡 军, 何金良, 刘 俊, 等. 特高压避雷器用 ZnO 压敏电阻电压梯度限值的探讨[J]. 高压电器, 2009, 45(1): 1-4.
HU Jun, HE Jin-liang, LIU Jun, et al. Analysis on voltage gradient limitation of ZnO Varistor in ultra high voltage arrester[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(1): 1-4.
- [8] 李庆玲, 程济兵, 王晓燕, 等. 输电线路氧化锌避雷器应用研究[J]. 高压电器, 2010, 46(4): 77-80.
LI Qing-ling, CHENG Ji-bing, WANG Xiao-yan, et al. The research of MOA application in transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(4): 77-80.
- [9] 孙 浩, 李兴文. 500 kV 瓷套式氧化锌避雷器电位分布的有限元分析与实验研究[J]. 高压电器, 2010, 46(3): 23-27.
SUN Hao, LI Xing-wen. Finite element calculation and experiment of potential distribution for a 500 kV porcelain zinc oxide arrester[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3): 23-27.
- [10] 张媛媛, 郑 浩, 施 荣, 等. 35 kV 输电线路避雷器的雷电放电电流和吸收能量[J]. 高压电器, 2007, 43(2): 118-121.
ZHANG Yuan-yuan, ZHENG Hao, SHI Rong, et al. Absorbed discharging energy and lightning discharging current analysis of surge arresters on 35 kV transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(2): 118-121.
- [11] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [12] 张纬钺, 何金良, 高玉明. 过电压防护及绝缘配合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [13] 吴维韩, 张芳榴. 电力系统过电压数值计算[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [14] 杜澍春, 陈维江. 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [15] 高 峰, 郭 洁, 徐 欣, 等. 交流金属氧化物避雷器受潮与阻性电流的关系[J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2629-2633.
GAO Feng, GUO Jie, XU Xin, et al. Relation between resistive current and MOA affected with damp [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11): 2629-2633.
- [16] 蒋国文, 王保山, 杭 文, 等. 国内 $\phi 35$ mm 氧化锌电阻片大电流耐受能力研究[J]. 电瓷避雷器, 2010(2): 40-43.
JIANG Guo-wen, WANG Bao-shan, HANG Wen, et al. Research of high current withstand capability for the domestic $\phi 35$ mm metal oxide resistance[J]. Insulators and

- Surge Arresters, 2010(2):40-43.
- [17] 彭向阳, 张元芳. 数字式雷电/操作冲击计数器的研制[J]. 高压电器, 1996, 32(5): 17-19.
- PENG Xiang-yang, ZHANG Yuan-fang. A digital counter for lightning surge and switching surge recording[J]. High Voltage Apparatus, 1996, 32(5): 17-19.
- [18] 彭向阳, 钟定珠, 李凯曼. 220 kV 线路多重雷击导致两侧开关断口绝缘击穿分析[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 146-148.
- PENG Xiang-yang, ZHONG Ding-zhu, LI Kai-man. Analysis on two breakers insulation strike faults caused by continued lightning strike of 220 kV transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 146-148.
- [19] 葛 猛, 韩学坤, 陶安培. 金属氧化物避雷器阀片老化缺陷的诊断及原因分析[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 145-147.
- GE Meng, HAN Xue-kun, TAO An-pei. Diagnosing and analysing the aged flaw of MOA valve piece[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3): 145-147.
- [20] 王兴贵, 李庆玲, 李效珍, 等. 氧化锌避雷器应用研究[J]. 高压电器, 2008, 44(2): 175-177.
- WANG Xing-gui, LI Qing-ling, LI Xiao-zhen, et al. Case study of MOA[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(2): 175-177.
- 彭向阳(1971—), 男, 教授级高工, 工学硕士, 长期从事高电压技术及输电技术工作。
- 王保山(1962—), 男, 高级工程师, 长期从事电气设备绝缘配合及避雷器技术研究工作。
- 彭发东(1985—), 男, 工学硕士, 工程师, 主要从事变压器及配网技术工作。
- 熊 易(1983—), 男, 工学硕士, 工程师, 主要从事电网过电压保护、避雷器检测技术工作。

(上接第 25 页)

- propagation in quiescent methane-air mixtures[J]. Combustion and Flame, 2008(4): 715-727.
- [19] LIU J B, WANG F, LEE L C, et al. Effect of discharge energy and cavity geometry on flame ignition by transient plasma [R]. USA: AIAA, 2004.
- [20] CATHEY C, WANG F, TANG T, et al. Transient plasma ignition for delay reduction in pulse detonation engines[R]. USA: AIAA, 2007.
- [21] 戴 荣, 栗保明. 电热化学炮等离子体增强燃烧过程研究[J]. 兵工学报, 2003, 24(3): 396-398.
- DAI Rong, LI Bao-ming. Study of plasma enhanced burning process in electro thermal chemical launcher experiment[J]. Acta Armamentaria, 2003, 24(3): 396-398.
- 刘兴建(1987—), 男, 硕士研究生, 从事等离子体点火与助燃的实验研究与数值模拟。

简 讯

高压电气国家工程实验室参展深圳第十四届中国 国际高新技术成果交易会

2012年11月16日上午,第十四届中国国际高新技术成果交易会(高交会)在深圳会展中心隆重开幕。全国人大常委会副委员长路甬祥、全国政协副主席、科技部部长万钢及国内外众多领导嘉宾出席开幕式,开幕式由高交会组委会主任、深圳市市长许勤主持。以西电集团整体科技资源为依托,以西高院为主体组建的高压电气国家工程实验室参展本次高交会,携带的展品及沙盘成为展区一道亮丽风景。

本届高交会以“推进科技创新,提升发展质量”为主题,设9个展馆,包括“高新技术成果交易、高新技术专业产品展、中国高新技术论坛、super-SUPER 专题活动、人才与智力交流会、不落幕的交易会”等六大板块。高压电气国家工程实验室展位设于国家发展和改革委员会专馆中,位处“支撑重大工程建设”展示区,采用126 kV 智能 GIS 及 126 kV 真空灭弧室两件实物、高压电气国家工程实验室沙盘模型,以及展板的方式集中展示了实验室的整体实力和重大科技成果,在现场获得良好反响和极大关注,并获得国家发改委颁发的最佳展示奖。

本届高交会由商务部、科技部、工信部、国家发改委、教育部、人力资源和社会保障部、农业部、国家知识产权局、中国科学院、中国工程院和深圳市政府共同举办,于11月21日结束,参展商近3 000家,总展览面积超过11万m²。